

Endoscop with at l ast one rev rsal syst m with a non-homogeneous refraction index

Patent Number: ☐ US6301043
Publication date: 2001-10-09
Inventor(s): LEI FANG (DE)
Applicant(s): STORZ KARL GMBH & CO KG (US)
Requested Patent: ☐ DE19729002
Application Number: US19980214354 19981231
Priority Number(s): DE19961030368 19960728; DE19971029002 19970707; WO1997DE01592 19970728
IPC Classification: G02B1/00
EC Classification: G02B23/24B
Equivalents: ☐ EP0916107 (WO9804949), JP2001508186T, ☐ WO9804949

Abstract

An endoscope having a distally disposed lens and an optical transmission system which transmits the image of the lens to the proximal end of the endoscope is provided. The transmission system includes at least one reversing system, which includes two elements in mutual mirror-inverted arrangement. Each element includes a rod lens with planar faces and at least one optically thin lens having a planar surface. The rod lenses consist of an inhomogeneous material having a positive dispersion and an inhomogeneous refractive index in the radial direction, while the thin lenses are plano-convex lenses

Data supplied from the **esp@cenet** database - I2



DEUTSCHES
PATENTAMT

21 Aktenzeichen: 197 29 002.7
22 Anmeldetag: 7. 7. 97
43 Offenlegungstag: 29. 1. 98

DE 197 29 002 A 1

66 Innere Priorität:
196 30 368.0 28.07.96

71 Anmelder:
Karl Storz GmbH & Co, 78532 Tuttlingen, DE

74 Vertreter:
Anwaltskanzlei München, Rösler, Steinmann, 80689
München

72 Erfinder:
Lei, Fang, 78591 Durchhausen, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Endoskop mit wenigstens einem Umkehrsystem mit inhomogenem Brechungsindex

- 57 Beschrieben wird ein Endoskop mit
- einem distal angeordneten Objektiv und
 - einem optischen Übertragungssystem, das das Bild des Objektivs zum proximalen Ende überträgt, und das wenigstens ein Umkehrsystem aufweist, wobei
 - jedes Umkehrsystem aus zwei symmetrischen Gliedern besteht,
 - von denen jedes Glied aus einer Stablinse mit planen Stirnflächen und einer optisch dünnen Linse besteht, die eine plane Fläche aufweist.
- Das erfindungsgemäße Endoskop zeichnet sich dadurch aus, daß die Stablinse aus einem Material mit positiver Dispersion und in Radialrichtung inhomogenem Brechungsindex bestehen, und daß die optisch dünnen Linsen plankonvexe Linsen sind.

DE 197 29 002 A 1

Technisches Gebiet

5

Die Erfindung bezieht sich ein Endoskop gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

Stand der Technik

10 Ein gattungsgemäßes Endoskop ist aus der US-PS 4,783,154 bekannt. Diese bekannte Endoskop weist ein distal angeordnetes Objektiv und ein optisches Übertragungssystem auf, das das Bild des am distalen Ende angeordneten Objektivs zum proximalen Ende, d. h. zu dem außerhalb des Hohlraums befindlichen Ende überträgt. Das Übertragungssystem weist wenigstens ein Umkehrsystem auf, das aus zwei symmetrischen Gliedern besteht, von denen jedes aus einer Stablinse und einer optisch dünnen plankonkaven Linse besteht. Die
15 Stablinse, die u. a. plane Stirnflächen aufweisen können, bestehen aus einem Material mit variierendem bzw. inhomogenem Brechungsindex. Auf die US-PS 4,783,154 und den auf dem Deckblatt dieser Druckschrift genannten Stand der Technik wird im übrigen zur Erläuterung aller hier nicht näher beschriebenen Einzelheiten ausdrücklich verwiesen.

Unter Umkehrsystem — auch als Relaislinsensystem bezeichnet — wird im Rahmen der vorliegenden Anmeldung ein optisches System verstanden, das eine 1 : 1-Abbildung ausführt. In Endoskopen werden in der Regel
20 mehrere — bevorzugt eine ungerade Zahl von Umkehrsystemen — zu einem Übertragungssystem mit einer der Zahl der Umkehrsysteme entsprechenden Zahl von Bildumkehrungen zusammengesetzt.

Bei bekannten Endoskopen mit ausschließlich aus homogenem Material bestehenden Linsen bestehen die beiden Glieder jedes Umkehrsystems häufig aus mehr als aus zwei Elementen. Bei dem aus der US-PS 4,783,154
25 bekannten gattungsgemäßen Endoskop steht ausschließlich der Ersatz von mehreren Linsenelementen herkömmlicher Endoskope durch wenigstens ein Linsenelement mit inhomogenem Brechungsindex, nicht jedoch die Verbesserung der "Abbildungsleistung" verglichen mit bekannten Endoskopen im Vordergrund.

Ferner ist es aus dem Artikel "Correction of chromatic Aberrations in GRIN endoscopes" von Dennis C. Leiner und Rochelle Prescott, erschienen in APPLIED OPTICS, Vol. 22, No. 3, S.383 ff., bekannt, chromatische
30 Bildfehler durch den Einsatz von Linsen zu verringern, die aus einem Material mit inhomogenem, d. h. variierendem Brechungsindex bestehen.

Bei Endoskopen, wie sie in der Medizin oder in der Technik zur Beobachtung in Hohlräumen, wie Körperhöhlen, Brennräumen von Motoren, Düsentriebwerken etc. eingesetzt werden, steht jedoch nicht die Korrektur chromatischer Bildfehler, sondern folgendes Problem im Vordergrund:

35 Je nach Anwendungsfall müssen Endoskope mit unterschiedlicher Länge eingesetzt werden. Um den Aufbau der Endoskope "standardisieren" zu können, ist es allgemein üblich, Endoskope unterschiedlicher Länge mit einer unterschiedlichen Zahl (1, 3, 5, ...) von Umkehrsystemen zu versehen, wobei die Umkehrsysteme unabhängig von der Länge des Endoskops immer identisch ausgebildet sind.

Die bislang tatsächlich eingesetzten Umkehrsysteme haben eine bestimmte Bildfeldkrümmung bzw. -wölbung. Die kumulierte Bildfeldkrümmung des Übertragungssystems ist damit von der Zahl der eingesetzten Umkehrsysteme abhängig. Bei den bekannten derzeit kommerziell erhältlichen Endoskopen wird die Bildfeldkrümmung des Übertragungssystems, d. h. die "aufaddierten bzw. kumulierten Bildfeldkrümmungen" der Umkehrsysteme durch eine entgegengesetzte Bildfeldkrümmung des jeweiligen Objektivs "kompensiert". Dies bedeutet, daß die Hersteller von Endoskopen für "unterschiedlich lange" Endoskope unterschiedliche Objektive einsetzen und damit bereit halten müssen, um Endoskope mit einer Länge und damit einer unterschiedlichen
45 Zahl von Umkehrsystemen entsprechend dem jeweiligen Anwendungsfall auf Bestellung kurzfristig fertigen zu können. Ein weiterer, nicht zu vernachlässigender Kostenaufwand resultiert aus der Berechnung einer Mehrzahl eigentlich — beispielsweise hinsichtlich des Blickwinkels und/oder des Bildwinkels — gleicher Objektive, die sich nur hinsichtlich ihrer Bildfeldkrümmung unterscheiden.

50 Diese Lagerhaltungs- und Berechnungsprobleme ließen sich umgehen, wenn jedes Umkehrsystem und damit auch das Übertragungssystem keine bzw. eine vernachlässigbar kleine Bildfeldkrümmung hätten. Damit könnte unabhängig von der Länge des Endoskops immer das selbe Objektiv Verwendung finden.

Aus der Literatur und insbesondere der Patentliteratur sind verschiedene Vorschläge für Umkehrsysteme für Endoskope bekannt, die keine bzw. eine vernachlässigbar kleine Bildfeldkrümmung aufweisen. Die bekannten
55 Vorschläge haben jedoch den Nachteil, daß sie eine vergleichsweise hohe Zahl von Linsen für jedes Umkehrsystem erfordern, so daß die Herstellkosten für kommerzielle Anwendungen in der Technik oder Medizin zu hoch sind.

Darstellung der Erfindung

60

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Endoskop anzugeben, dessen optisches Übertragungssystem aus Umkehr- bzw. Relaislinsensystemen besteht, deren Bildfeldkrümmung so gering ist, daß auch bei einer stark unterschiedlichen Zahl von Umkehr- bzw. Relaislinsensystemen keine Kompensation der Bildfeldkrümmung bzw. -wölbung des Übertragungssystems durch das distal angeordnete Objektiv erforderlich ist, so daß unabhängig
65 von der Zahl der Umkehr- bzw. Relaislinsensysteme immer das selbe Objektiv eingesetzt werden kann.

Eine erfindungsgemäße Lösung dieser Aufgabe ist im Patentanspruch 1 angegeben. Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der Ansprüche 2 folgende.

Erfindungsgemäß ist erkannt worden, daß die gestellte Aufgabe dadurch gelöst werden kann, daß von einem

Endoskop gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 ausgegangen und dieses Endoskop dadurch weitergebildet wird, daß die Stablinse aus einem Material mit positiver Dispersion und in Radialrichtung inhomogenem Brechungsindex bestehen. Weiterhin sind die optisch dünnen Linsen plankonvexe Linsen.

Der Brechungsindex, der in Radialrichtung (also senkrecht zur optischen Achse) variiert, nimmt als Funktion der Wellenlänge mit zunehmender Wellenlänge ab.

Dabei geht die Erfindung von folgender Grundüberlegung aus:

Ein herkömmliches Umkehrsystem mit örtlich nicht variierendem Brechungsindex, das zwei zur Blende symmetrische Glieder aufweist, von denen jedes eine Stablinse aufweist, — wie es beispielsweise von Hopkins vorgeschlagen worden ist und derzeit von einer Reihe von Herstellern gefertigt wird — weist eine starke Bildfeldwölbung und einen großen Astigmatismus auf. Diese Bildfehler müssen durch ein kompliziertes Design des Objektivs kompensiert werden.

Andererseits weisen Umkehrsysteme mit Stablinse bzw. Stäben mit inhomogenem Brechungsindex (GRIN-Stäbe) Farbfehler auf, die ebenfalls durch das Objektiv kompensiert werden müssen.

Erfindungsgemäß werden die Nachteile der bekannten Umkehrsysteme dadurch vermieden, daß anstelle einer Stablinse bei herkömmlicher Ausgestaltung ein GRIN-Stab verwendet wird, der eine positive Dispersion und damit einen überkorrigierten Farblängsfehler aufweist. Durch die Inhomogenität des Brechungsindex ist es möglich, bei planen Endflächen die gewünschte optische Wirkung zu erzielen und dennoch den Astigmatismus und die Bildfeldwölbung praktisch vollständig zu korrigieren. Die dünne plankonvexe Linse, die einen unterkorrigierten Farblängsfehler aufweist, dient im wesentlichen zur Korrektur des Farblängsfehlers des GRIN-Stabs.

Durch die erfindungsgemäße Ausbildung der Umkehr- bzw. Relaislinsensysteme ist es damit möglich, nicht nur die chromatischen Bildfehler von Übertragungssystemen von Endoskopen zu korrigieren, sondern auch die Bildfeldkrümmung bzw. -wölbung jedes Umkehrsystems so klein zu halten, daß auch bei einer stark unterschiedlichen Zahl von Umkehrsystemen und damit über eine große Variationsbreite von Endoskoplängen keine unterschiedlichen Objektive erforderlich sind: In der Praxis kann aufgrund der erfindungsgemäßen Ausbildung der Umkehrsysteme für Endoskope bei zwischen 1 und 15 Umkehr- bzw. Relaislinsensystemen das selbe Objektiv verwendet werden, ohne daß inakzeptable Bildfehler und insbesondere Bildfeldwölbungen auftreten würden.

Da alle Bildfehler im Umkehrsystem korrigiert sind, erhält man ein modulares Umkehrsystem, das in einer praktisch beliebigen Zahl zu einem Übertragungssystem kombiniert werden kann!

Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der Ansprüche 2 folgende:

Gemäß Anspruch 2 ist die plane Fläche der jeweiligen dünnen Linse der Stablinse des selben Gliedes zugekehrt.

Dies vereinfacht den Aufbau der einzelnen Umkehrsysteme insbesondere dann, wenn gemäß Anspruch 3 die Stablinse und die dünne Linse jedes Gliedes verkittet sind, beträchtlich. Aber auch dann, wenn die beiden Linsen nicht verkittet sind, wird der Zusammenbau durch einfacher aufgebaute Abstandhalter vereinfacht.

Der erfindungsgemäße Aufbau hat den weiteren Vorteil, daß es nicht erforderlich ist, daß auch die dünne Linse aus einem Material mit inhomogenem Brechungsindex besteht. Somit kann gemäß Anspruch 4 die dünne plankonvexe Linse vergleichsweise einfach aufgebaut sein und aus einem Material mit homogenem Brechungsindex bestehen.

Im Anspruch 5 ist eine Bedingung für den Krümmungsradius r der gekrümmten Fläche der plankonvexen Linse mit einer axialen Dicke d angegeben. Gemäß der erfindungsgemäß aufgefundenen Ungleichung gilt:

$$0,9 \cdot \frac{(n_1 - 1) \cdot v_1}{1 - n_1 \cdot v_1 \cdot \Delta n_g} \cdot \left(\frac{n_1}{n_g} \cdot \Delta L_{CF} - \Delta n_g \cdot d \right) \leq r \leq 1,3 \cdot \frac{(n_1 - 1) \cdot v_1}{1 - n_1 \cdot v_1 \cdot \Delta n_g} \cdot \left(\frac{n_1}{n_g} \cdot \Delta L_{CF} - \Delta n_g \cdot d \right)$$

mit

$$\Delta n_g = \frac{n_g - 1}{n_g \cdot v_g} - \frac{n_1 - 1}{n_1 \cdot v_1};$$

dabei bedeuten:

n_g Brechungsindex des inhomogenen Materials auf der optischen Achse,

v_g Abbe'sche Zahl des inhomogenen Materials auf der optischen Achse,

n_1 Brechungsindex des Materials der dünnen Linse,

v_1 Abbe'sche Zahl des Materials der dünnen Linse,

ΔL_{CF} die axiale Farbabweichung des inhomogenen Materials.

Die Korrektur der Farbabweichung bei gleichzeitiger Ebnung des Bildfeldes wird weiter verbessert, wenn für die Beträge der Brennweite f_g der Stablinse aus einem Material mit einem inhomogenem Brechungsindex und der Brennweite f_l der dünnen Linse gemäß Anspruch 6 gilt:

$$|f_g/f_l| > 0,1$$

Im Anspruch 7 ist angegeben, daß der Brechungsindex des inhomogenen Materials der Stablinse ausgehend von der optischen Achse nach außen, also mit zunehmendem Abstand von der optischen Achse abnimmt. Die

Funktion der Abnahme kann dabei insbesondere einen wenigstens in etwa parabelförmigen Verlauf haben. Einen derartigen Verlauf kann man beispielsweise dadurch erhalten, daß man Glasstäbe aus einem geeigneten Grundmaterial in ein Ionenaustauscherbad einbringt. Durch den Ionenaustausch erhält man in Radialrichtung — also normal zur Umfangsfläche der Glasstäbe — die gewünschte Änderung des Brechungsindex. Selbstverständlich kann man anstelle von Glasstäben auch Stäbe aus einem Kunststoffmaterial einsetzen.

In den Ansprüchen 9 und 10 sind Materialdaten für ein kommerziell erhältliches Material mit inhomogenem Brechungsindex angegeben, das für die Realisierung der Erfindung besonders vorteilhaft ist:

Gemäß Anspruch 9 hat der Brechungsindex auf der optischen Achse für die Wellenlänge $\lambda = 587,6 \text{ nm}$ den Wert 1,5359, der bei einem Abstand $|r| = 1,35 \text{ mm}$ von der optischen Achse um $2,8 \cdot 10^{-3}$ abgenommen hat. Eine derartige Variation des Brechungsindex läßt sich mit bekannten Methoden für die Erzeugung eines variierenden Brechungsindex realisieren und ist für Endoskope, die einen Durchmesser von ca. 1,5 bis mehr als 8 mm, bevorzugt 4 mm haben, besonders geeignet.

Im Anspruch 10 ist eine bevorzugte Möglichkeit für die Wellenlängen-Abhängigkeit des Brechungsindex angegeben, gemäß der gilt:

$$n(\lambda = 468,1 \text{ nm}) = 1,5430$$

$$n(\lambda = 587,6 \text{ nm}) = 1,5359$$

$$n(\lambda = 656,3 \text{ nm}) = 1,5329$$

Die Erfindung wird nachstehend ohne Beschränkung des allgemeinen Erfindungsgedankens anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnung exemplarisch beschrieben, auf die im übrigen hinsichtlich der Offenbarung aller im Text nicht näher erläuterten erfindungsgemäßen Einzelheiten ausdrücklich verwiesen wird. Die einzige Figur der Zeichnung zeigt einen Linsenschnitt durch Ausführungsbeispiele der Erfindung.

Bei den in der Figur dargestellten Ausführungsbeispielen ist pauschal mit dem Bezugszeichen 1 ein Objektiv bezeichnet, das am distalen Ende eines nicht näher dargestellten Endoskops angeordnet ist, und ein Bild einer nicht dargestellten Szene in eine Bildebene 2 abbildet.

Die Bildebene 2 wird von einer Mehrzahl von Relaislinsen bzw. Umkehrsystemen, die nachstehend noch näher beschrieben werden, und von denen jedes eine 1 : 1-Abbildung ausführt, bis zum proximalen Ende des Endoskops abgebildet.

Bei dem in der Figur dargestellten Ausführungsbeispiel ist lediglich ein Umkehrsystem dargestellt, das aus den Linsenelementen 3, 4, 6 und 7 besteht, und das die Ebene 2 in die (weitere) Bildebene 8 abbildet.

Mit 5 ist die Blende des (dargestellten) Umkehrsystems bezeichnet.

Bei dem gezeigten Ausführungsbeispiel besteht das Umkehrsystem aus zwei Gliedern, die bezüglich der Blende 5 symmetrisch sind. Jedes Glied weist einen Stab 3 bzw. 7 mit planen Stirnflächen auf, der aus einem Material mit inhomogenem Brechungsindex besteht; insbesondere weist der Brechungsindex eine Abnahme ausgehend von der optischen Achse in Radialrichtung, also senkrecht zur optischen Achse auf, wobei die Variationsfunktion rotationssymmetrisch ist.

An die der Blende 5 zugekehrte Stirnfläche der Stäbe 3 bzw. 7 ist eine plankonvexe Linse 4 bzw. 6 angekittet, die "optisch dünn" ist.

Wie bereits ausgeführt, besteht jeder der beiden Stäbe 3 bzw. 7 aus einem Material mit inhomogenem Brechungsindex, während die Linsen 4 bzw. 6 aus einem Material mit homogenem Brechungsindex bestehen.

In den folgenden Tabellen sind numerische Daten für drei Ausführungsbeispiele angegeben:

1. Ausführungsbeispiel

Fläche Nr. i	Radius	Abstand	Brechungs- index n	Abbe' sche Zahl v
1	Plan	27,54	1,5359*	53,06
2	Plan	1	1,62	36,35
3	-52,31	0,84	Luft	
4	52,31	1	1,62	36,35
5	Plan	27,54	1,5359*	53,06
6	Plan			

2. Ausführungsbeispiel

Fläche Nr. i	Radius	Abstand	Brechungs- index n	Abbe'sche Zahl v
1	Plan	26,22	1,5359*	53,06
2	Plan	1	1,6405	60,08
3	-38,91	4,8	Luft	
4	38,91	1	1,6405	60,08
5	Plan	26,22	1,5359*	53,06
6	plan			

3. Ausführungsbeispiel

Fläche Nr. i	Radius	Abstand	Brechungs- index n	Abbe'sche Zahl v
1	Plan	28,84	1,5359*	53,06
2	Plan	2,5	1,7847	26,07
3	-106,54	0,66	Luft	
4	106,54	2,5	1,7847	26,07
5	Plan	28,84	1,5359*	53,06
6	plan			

Die Flächennummern i sind von der der Ebene 2 zugekehrten Stirnfläche (Nummer 1) des Stabs 3 bis zu der der Ebene 8 zugekehrten Stirnfläche (Nummer 6) des Stabs 7 "durchgezählt". In üblicher Weise sind Kittflächen nur einmal aufgeführt. Der in der Zeile mit einer Flächen-Nummer i angegebene Abstand ist die Linsendicke bzw. der sog. Luftabstand zwischen den auf der optischen Achse gelegenen Scheiteln der Flächen i und (i+1). Entsprechend sind der Brechungsindex n und die Abbe'sche Zahl v die Materialdaten des Materials zwischen den Flächen i und (i+1).

In den Tabellen sind die Flächenradien und die Abstände bzw. Dicken in Millimeter angegeben. Die Brechungsindices n und die Abbe'schen Zahlen sind jeweils für die Wellenlänge $\lambda = 587,6$ nm angegeben.

In der folgenden Tabelle sind die optischen Eigenschaften, nämlich die laterale sphärische Aberration δ_y , der Farbfehler und die sagittale (S) und tangential (T) Bildfeldwölbung der vorstehend numerisch angegebenen drei Ausführungsbeispiele mit einem herkömmlichen Umkehrsystem aus homogenem Material, wie es in einem kommerziell erhältlichen System eingesetzt wird, verglichen. Weiterhin sind die entsprechenden Daten für einen Stab 3 bzw. 7 aus inhomogenem Material angegeben:

	sphärische Aberr. δ_y	Farbfehler	Sagittale Bildfeld- wölbung S	Tangentia- le Bild- feldwöl- bung T
Herkömmll. System	0,00007	0,00001	-0,081	-0,137
Inhom. Stab	0,00027	-0,00032	-0,0039	0,0072
1. Ausführ.	0,00017	0	-0,0048	0,0023
2. Ausführ.	0,00035	-0,00006	-0,0076	0,0014
3. Ausführ.	0,00036	0,00004	-0,006	0,006

Die vorstehende Tabelle "Zusammenstellung verschiedener Bildfehler" zeigt, daß die erfindungsgemäßen Systeme verglichen mit herkömmlichen, derzeit in Endoskopen eingesetzten Systemen bei geringfügig größerer — aber in der Praxis vernachlässigbar kleiner — lateraler sphärischer Aberration und geringfügig größerem — in der Praxis ebenfalls vernachlässigbarem — Farbfehler eine um bis zu 2 Größenordnungen geringere Bildfeldwölbung in tangentialer und sagittaler Richtung haben.

Damit können die erfindungsgemäßen Umkehrsysteme in stark unterschiedlicher Zahl — in der Praxis zwischen 1 und 15 — zu einem Übertragungssystem kombiniert werden, ohne daß die kumulierte Bildfeldwölbung durch eine "entgegengesetzte Bildfeldwölbung" des Objektivs 1 kompensiert werden müßte.

Im Gegensatz zu bekannten Objektiven von Endoskopen muß damit das Objektiv 1 keine — für eine bestimmte Zahl von Umkehrsystemen vorgegebene — tangentiale und laterale Bildfeldwölbung haben.

Damit ist ein modularer Aufbau von unterschiedlich langen Endoskopen mit entsprechend unterschiedlicher Zahl von Umkehrsystemen aus einer einzigen Art von Umkehrsystemen und einem einzigen Objektivtyp (für jede Blickrichtung) möglich. Darüberhinaus wird die Berechnung des Objektivs vereinfacht.

Patentansprüche

1. Endoskop mit

- einem distal angeordneten Objektiv und
- einem optischen Übertragungssystem, das das Bild des Objektivs zum proximalen Ende überträgt, und das wenigstens ein Umkehrsystem aufweist, wobei
- jedes Umkehrsystem aus zwei symmetrischen Gliedern besteht,
- von denen jedes Glied aus einer Stablinse mit planen Stirnflächen und einer optisch dünnen Linse besteht, die eine plane Fläche aufweist,

dadurch gekennzeichnet, daß die Stablinse aus einem Material mit positiver Dispersion und in Radialrichtung inhomogenem Brechungsindex bestehen, und daß die optisch dünnen Linsen plankonvexe Linsen sind.

2. Endoskop nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die plane Fläche der dünnen Linsen der Stablinse desselben Gliedes zugekehrt ist.

3. Endoskop nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Stablinse und die dünne Linse jedes Gliedes verkittet sind.

4. Endoskop nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die dünne Linse aus einem Material mit homogenem Brechungsindex besteht.

5. Endoskop nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß für den Krümmungsradius r der gekrümmten Fläche der plankonvexen Linse mit einer axialen Dicke d gilt:

$$0,9 \cdot \frac{(n_1 - 1) \cdot v_1}{1 - n_1 \cdot v_1 \cdot \Delta n_g} \cdot \left(\frac{n_1}{n_g} \cdot \Delta L_{\alpha} - \Delta n_g \cdot d \right) \leq r \leq 1,3 \cdot \frac{(n_1 - 1) \cdot v_1}{1 - n_1 \cdot v_1 \cdot \Delta n_g} \cdot \left(\frac{n_1}{n_g} \cdot \Delta L_{\alpha} - \Delta n_g \cdot d \right)$$

mit

$$\Delta n_d = \frac{n_g - 1}{n_g \cdot v_g} - \frac{n_l - 1}{n_l \cdot v_l};$$

dabei bedeuten:

n_g Brechungsindex des inhomogenen Materials auf der optischen Achse,

v_g Abbe'sche Zahl des inhomogenen Materials auf der optischen Achse,

n_l Brechungsindex des Materials der dünnen Linse,

v_l Abbe'sche Zahl des Materials der dünnen Linse,

ΔL_{CF} die axiale Farbabweichung des inhomogenen Materials.

6. Endoskop nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß für die Beträge der Brennweite f_g der Stablinse aus Material mit einem inhomogenem Brechungsindex und der Brennweite f_l der dünnen Linse gilt:

$$|f_g/f_l| > 0,1$$

7. Endoskop nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Brechungsindex des inhomogenen Materials ausgehend von der optischen Achse nach außen abnimmt.

8. Endoskop nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Abnahme einen wenigstens in etwa parabelförmigen Verlauf hat.

9. Endoskop nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Brechungsindex auf der optischen Achse für die Wellenlänge $\lambda = 587,6$ nm den Wert 1,5359 hat, der bei einem Abstand $|r| = 1,35$ mm von der optischen Achse um $2,8 \cdot 10^{-3}$ abgenommen hat.

10. Endoskop nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß für die Wellenlängen-Abhängigkeit des Brechungsindex gilt:

$$n(\lambda = 486,1 \text{ nm}) = 1,5430$$

$$n(\lambda = 587,6 \text{ nm}) = 1,5359$$

$$n(\lambda = 656,3 \text{ nm}) = 1,5329.$$

11. Endoskop nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß das distal angeordnete Objektiv derart aufgebaut ist, daß es praktisch keine Bildfeldkrümmung bzw. -wölbung hat.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

